

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DE ZACATE BALLICO (*Lolium perene L.*) Y BERMUDA
(*Cynodon dactylon*) y *Kalanchoe serrata* COMO ESPECIES CON
POTENCIAL PARA FITOMINERÍA

Tesis

Que presenta MARCELA PÉREZ CASTRO

como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Torreón, Coahuila

Mayo 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DE ZACATE BALLICO (*Lolium perene* L.) Y BERMUDA
(*Cynodon dactylon*) y *Kalanchoe serrata* COMO ESPECIES CON
POTENCIAL PARA FITOMINERÍA

Tesis

Que presenta MARCELA PÉREZ CASTRO

como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA



Dr. Anselmo Gonzales Torres
Director UAAAN



Dr. Mario García Carrillo
Director externo

Torreón, Coahuila

Mayo 2024

EVALUACIÓN DE ZACATE BALLICO (*Lolium perene* L.) Y BERMUDA
(*Cynodon dactylon*) y *kalanchoe serrata* COMO ESPECIES CON
POTENCIAL PARA FITOMINERIA

Tesis

Elaborada por MARCELA PÉREZ CASTRO como requisito parcial para
obtener el grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria con la
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Anselmo Gonzales Torres
Asesor principal



Dr. Mario García Carrillo
Asesor



Dr. Eduardo Arón Flores Hernández
Asesor



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme salud y permíteme llegar aquí.

Al posgrado en ciencias en producción agropecuaria por abrirme las puertas para poder seguir preparándome.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por su apoyo para poder realizar mis estudios.

A mi comité de asesores Dr. Anselmo González Torres, al Dr. Eduardo Aron Flores Hernández, y en especial al Dr. Mario García Carrillo por permitirme trabajar con él en este proyecto, por su confianza, apoyo y paciencia.

A los Técnicos Laboratoristas Silverio Alvares y Norma Rangel del laboratorio de suelos, por su tiempo y asesoría, a la MC Julieta Ordoñez del laboratorio de Bromatología por permitirme trabajar en el laboratorio, al Dr. Ricardo Israel Ramírez Gottfried por su colaboración. Al Dr. José Reyes Carrillo, por su paciencia y consejos.

A mis compañeros y doctores que estuvieron presentes en esta etapa de formación académica.

A mis compañeros que se convirtieron en Amigos: Patricia Araceli Maldonado Calvo, Angelica Méndez Ramírez y Regino Vázquez Montiel por acompañarme y estar siempre al pendiente.

A Oralía Sánchez Borrego y Esther Peña Revuelta por sus consejos, apoyo y su amistad.

DEDICATORIAS

A Dios y mi virgencita de Guadalupe, por permitirme llegar a este día, darme vida y salud para cumplir este sueño.

A mis hijos Mayte y Mauricio por su amor, paciencia y entendimiento en lo que mamá estudiaba, son lo más importante y mi mayor motivación todos los días, los amo con todo mi corazón mis niños hermosos.

A mi esposo Miguel Piña Carabeo por su amor, apoyo y comprensión, sobre todo en esta etapa.

A mi mamá Estela Castro Bañuelos por sus bendiciones todos los días y su apoyo en todo momento.

A mis hermanas Karina, Rosario y Alejandra, por creer en mí y a mis sobrinos por siempre apoyarme.

En especial a mi papá ✚ Roberto Pérez Castro se lo prometí me tardé un poco, pero lo conseguí siempre me dijo "nunca es tarde para seguir preparándose" la vida no permitió que lo pudiera ver, pero sé que siempre está a mi lado.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIAS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
I INTRODUCCIÓN.....	1
II REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Minería	4
2.2 Fitominería.....	4
2.3 Hiperacumulador	5
2.4 Metales pesados.....	5
2.5 Biorremediación	5
2.5 Fitorremediación	6
2.6 Fitoestabilización.....	7
2.6 <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers. (Bermuda).....	7
2.7 <i>Kalanchoe Serrata</i>	7
2.8 <i>Rye Grass</i>	7
III MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1 Área de estudio	8
3.2 Ubicación de la presa de jales	9
3.3 Toma de Muestras de sustratos.....	9

3.4 Secado de muestras-----	10
3.5 Recolección de plantas -----	11
3.6 Pruebas de germinación de semillas-----	11
3.7 Análisis físico químicos de sustratos -----	12
3.13 Tratamientos evaluados-----	13
3.9 Preparación de macetas -----	14
3.10 Establecimiento de experimento-----	14
3.11 Análisis de agua de riego -----	15
3.12 Calendario de riegos -----	15
3.13 Medición de altura de planta-----	15
3.14 Cosecha de plantas -----	16
3.15 Secado de muestras -----	16
3.16 Molido de la raíz y parte aérea -----	17
3.17 Procedimiento de extracción de metales -----	18
3.18 Determinación de metales pesados-----	21
3.19 Análisis estadístico de los datos-----	22
IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	23
4.1 Análisis de Sustrato -----	23
4.2 Determinación de Oro y plata en sustratos -----	23
4.3 Análisis de agua -----	24
4.4 Medición de plantas -----	25
4.4.1 Altura <i>Lolium perene L.</i> -----	25
4.4.2 Altura <i>Cynodon dactylon</i> -----	26
4.4.3 Altura <i>Kalanchoe serrata</i> -----	27
4.5 Concentración de metales en las partes de la planta -----	27

4.5.1 Oro	28
4.5.2 Plata	29
Discusión	31
V.- CONCLUSIONES	34
VI.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Mapa de UAAAN UL (maps, 2024b). -----	8
Figura 2. Estructura en la que se estableció el experimento. -----	9
Figura 3.- Ubicación de Hidalgo del Parral, Chihuahua (maps, 2024a). -----	9
Figura 4.- Sustrato de jales de mina. -----	10
Figura 5.- Secado de sustrato. -----	10
Figura 6.- Muestras de sustrato para análisis. -----	11
Figura 7.- Platas de Kalanchoe serrata. -----	11
Figura 8.- Semillas seleccionadas -----	12
Figura 9.- Población de semillas germinadas. -----	12
Figura 10.- Preparación de macetas. -----	14
Figura 11.- Siembra y trasplante. -----	15
Figura 12.- Toma de altura de planta -----	15
Figura 13.- Secado de raíz y parte aérea. -----	16
Figura 14.- Estufa de secado marca Felisa. -----	16
Figura 15.- Secado de muestras en Estufa. -----	17
Figura 16.- Molido de muestras. -----	17
Figura 17.- Muestras obtenidas para análisis. -----	18
Figura 18.- Pesado de muestra. -----	18
Figura 19.- Calcinación. -----	19
Figura 20.- Enfriado de ceniza. -----	19
Figura 21.- Reposo de muestra. -----	19
Figura 22.- Filtrado de muestras. -----	20
Figura 23.- Segundo filtrado de muestra. -----	20

Figura 24.- Muestra obtenida. -----	21
Figura 26.- Determinación de oro y plata en el espectrofotómetro. -----	21

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Distribución de los tratamientos-----	13
Cuadro 2.- Resultados de los análisis fisicoquímicos de los sustratos utilizados. -----	23
Cuadro 3.- Resultados de análisis de oro y plata en los sustratos. -----	23
Cuadro 4.- Análisis de agua parámetros Cationes y Aniones -----	24
Cuadro 5.- Resultados de análisis de agua parámetros Salinidad -----	24
Cuadro 6.- Tendencias del desarrollo de plantas Lolium perene L. -----	25
Cuadro 7.- Tendencias del desarrollo de plantas Cynodon dactylon. -----	26
Cuadro 8.- Tendencias del desarrollo de plantas Kalanchoe serrata. -----	27
Cuadro 9.- Concentración de oro en la interacción sustrato y raíz-----	28
Cuadro 10.- Concentración de oro en la interacción sustrato y parte aérea. -----	29
Cuadro 11.- Concentración de plata en la interacción sustrato y raíz-----	30
Cuadro 12.- Concentración de plata en la interacción sustrato y parte aérea. -----	31

RESUMEN

Evaluación de zacate ballico (*Lolium perene L.*) y bermuda (*Cynodon dactylon*) y *Kalanchoe serrata* como especies con potencial para fitominería

Marcela Pérez Castro

Para obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Anselmo Gonzales Torres

Director de tesis

El suelo es el medio más estático, donde los contaminantes pueden durar mucho tiempo. La fitominería se describe como, la producción y cosecha de los metales, a través de plantas hiperacumuladoras que acumulan en su biomasa. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar la capacidad de extracción de oro y plata por las especies *Lolium perene L.* y *Cynodon dactylon* y *Kalanchoe serrata*. Se realizó un muestreo de sustratos en la presa de Jales de Mina en el municipio de San Juanico en municipio de Hidalgo del Parral, en el estado Chihuahua. El establecimiento de la investigación y los análisis de laboratorio se llevó a cabo en la UAAAN UL. Durante el ciclo 2022, 2023, Se establecieron las especies a evaluar, en macetas dentro de un invernadero de malla sombra, con un diseño experimental completamente azar con una factorial de 3X3 con 4 repeticiones, por un periodo de ocho semanas, posteriormente fueron cosechadas, separadas en raíz, y parte aérea, después se realizó un proceso de secado, molienda y determinación de metales con ayuda de un equipo de absorción atómica Pekin Elmer, el análisis de los datos se realizó en el programa estadístico SAS. Los resultados nos muestran, que las especies evaluadas con los sustratos, tienen la capacidad de extraer oro y plata en su raíz y parte aérea siendo la más alta concentración en las raíces.

Palabras clave: Fitominería, Hiperacumuladoras, Sustratos, Oro, Plata.

ABSTRACT

Evaluation of zacate ballico (*Lolium perene* L.) and bermuda (*Cynodon dactylon*) and *Kalanchoe serrata* as species with potential for phytomineriería

Marcela Pérez Castro

Para obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Anselmo Gonzales Torres

Director de tesis

Soil is the most static medium, where contaminants can last for a long time. Phytomineralization is described as the production and harvesting of metals by hyperaccumulating plants that accumulate in their biomass. The present research work aims to evaluate the gold and silver extraction capacity of *Lolium perene* L. and *Cynodon dactylon* and *Kalanchoe serrata* species. A substrate sampling was carried out at the San Juanico mine dam in the municipality of Hidalgo del Parral, in the state of Chihuahua. The research establishment and laboratories were carried out at the UAAAN UL. During the 2022, 2023 cycle, the species to be evaluated were established in pots in a greenhouse with shade netting, with a completely randomized experimental design with a 3X3 factorial with 4 repetitions, for a period of eight weeks, then they were harvested, separated into root and aerial part, then a process of drying, grinding and determination was performed in a Pekin Elmer atomic absorption equipment, the data analysis was performed in the SAS statistical program. The results showed that the species evaluated with the substrates have the capacity to extract gold and silver in their roots and aerial parts, with the highest concentration in the roots.

Key words: Phytomineria, Hyperaccumulators, Substrates, Gold, Silver.

I INTRODUCCIÓN

El suelo es el medio más estático, donde los contaminantes pueden durar mucho tiempo. Esta permanencia a largo plazo es especialmente grave en el caso de contaminantes inorgánicos como los metales pesados, que no pueden ser degradados por si solos.

Los relaves o jales mineros son subproductos del procesamiento de minerales y generalmente se depositan en estanques al aire libre sin ningún cuidado. Son mezclas de arena, material sólido de grano fino, agua y cantidades significativas de metales pesados. La descarga anual de estos desechos de minas en el mundo supera los 10 mil millones de toneladas. (Wang, Ji, Hu, Liu, & Sun, 2017)

México es un país con una larga historia de minería de oro a cielo abierto y subterránea. Si bien el principal productor de oro en los últimos años ha sido China (con una producción anual cercana a las 300 toneladas), la producción de oro en México en los últimos cuatro años ha permitido ubicarnos como uno de los 12 principales países productores de oro a nivel mundial. La producción anual de oro en México en los últimos años ha alcanzado las 75 toneladas anuales. Como resultado de esta histórica y moderna actividad minera, se han generado volúmenes de desechos del orden de millones de toneladas, y estos desechos contienen una concentración de oro residual (Victor, Christopher W. N., & Mayra, 2012) es así como estas actividades que implican excavaciones y alteraciones de la corteza terrestre han aumentado la dispersión de metales pesados y otros contaminantes relacionados (Philip Isaac, Mehmet Salim, Meltem, & Mehmet, 2018)

Esto propaga la contaminación por metales pesados en el suelo lo que lo ha convertido en un problema ambiental grave a nivel mundial (Liang et al., 2017) La fitominería se describe como, la producción y cosecha de los metales por plantas hiperacumuladoras que acumulan en su biomasa (Dang & Li, 2022) esto nos lleva a establecer el diseño de una buena implementación de la

fitominería, la cual consiste en elegir una especie en función al aérea específica y sus condiciones climáticas (Victor et al., 2012)

La disminución de metales y el incremento en la fertilidad de los sustratos, se consideran los dos principales aportaciones después de la fitominería (V., A., & P., 2013).

El primer trabajo de investigación en Oro verdadero se realizó en 1998 este proceso de fitominería se da durante la fitoextracción de plantas hiperacumuladoras que lo absorben en sus partes vegetativas raíz, tallo, hojas (Dinh, Dobo, & Kovacs, 2022a) De aquí que la fitominería promete ser una tecnología de recuperación de oro económicamente viable en ciertos lugares del mundo; aunque el sistema nunca competirá con la minería convencional (Victor, Christopher, Mayra, Miguel, & Joel, 2011).

La fitominería podría ayudar con el cierre sostenible de sitios mineros, ya que el oro se recupera de plantas que generan ingresos a partir de las etapas iniciales de revegetación y rehabilitación (Victor et al., 2011) Por lo tanto, la fitominería de oro es ecológica y estéticamente agradable;(Liuwei et al., 2020).

El suelo después que termina la minería pareciera ser atractivo visual pero lo que en realidad es un suelo altamente contaminado y dañino para el ambiente (Sekhohola-Dlamini, Keshinro, Masudi, & Cowan, 2022).

El rendimiento esperado es de una libra de metal preciosos que se obtiene, de la extracción de minerales por cada tonelada de relave obtenidas (Carlos & Fernando, 2022).

La aplicación de la fitominería bien diseñada, consiste en una especie elegida en función de las condiciones climáticas y un producto químico elegido teniendo en cuenta las restricciones geoquímicas y ambientales. Resultados de esta investigación nos muestran que las concentraciones económicas de oro se pueden inducir en los tejidos vegetales utilizando el sistema conocido como fitominería de oro (Victor et al., 2011) las plantas hiperacumuladoras una vez terminado su proceso se cosecha y se procesa (Maluckov, 2015).

La fitominería de metales preciosos como lo es el Au es un enfoque "verde" para la práctica de minería ambientalmente sensible, esta implica el uso de plantas previamente seleccionadas para extraer metales valiosos de sustratos sólidos y líquidos. (V. et al., 2013).

Considerando los antecedentes expuestos, el objetivo de la presente investigación es evaluar la capacidad de absorción y acumulación de Au y Ag en la raíz

y parte aérea de las especies (*Lolium perenne L*), (*Cynodon dactylon*) y *Kalanchoe serrata* en jales de minería.

II REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Minería

La minería en la época colonial, el sistema productivo se dedica exclusivamente a la extracción y el comercio de los metales preciosos, especialmente la plata (Robles Berumen & Foladori, 2019)

Los yacimientos minerales que se están en la naturaleza se ubican en zonas pequeñas localizadas, las cuales se agotan debido a la explotación económica y a la industrialización desordenada de este recurso (Sheoran, Sheoran, & Poonia, 2009).

Al contorno de los reales de mina, crearon centros mineros que facilitan las condiciones adecuadas para una incorporación socioeconómica en los centros (Zambrano, 2022)

2.2 Fitominería

El descubrimiento de metales preciosos en Sudáfrica, (data en la era precolonial) fue de suma importancia en el crecimiento de la economía. Dentro de los metales preciosos, por primera vez el oro fue descubierto en el área de Barberton en el año 1884 (Akinbile, Makhubela, & Ambushe, 2023).

La fitominería ha emanado como una técnica ecológica racional para la extracción de elementos valiosos que se encuentran en suelos contaminados donde la minería tradicional ya no puede hacer nada, la acumulación de metales de suelos en las plantas es solo la primera etapa la cual se refiere como proceso de fitoextracción (Dinh, Dobo, & Kovacs, 2022b).

La fitominería es la producción que se obtiene de una cosecha de un metal mediante un cultivo, esto se refiere a que las plantas acumulan altas concentraciones de metales (Robert R. Brooks, Chambers, Nicks, & Robinson, 1998).

La fitominería de oro consiste en sacar oro de un sustrato de suelo mediante la cosecha de plantas hiperacumuladoras seleccionadas, tiene el potencial de

permitir la explotación de minerales mediante plantas acumuladoras capaces de extraer metales en suelos mineralizados que son muy pobres para la minería convencional (Sheoran, S.Sheoran, & Poonia, 2013).

2.3 Hiperacumulador

El término hiperacumulador, se refiere a la concentración en las plantas, independientemente de la concentración en el sustrato (R. R. Brooks, Lee, Reeves, & Jaffre, 1977).

2.4 Metales pesados

Los metales pesados se encuentran entre la gama de contaminantes del medioambiente, como efectos secundarios, casi todas las actividades ya sean naturales o humanas contribuyen a la producción de metales pesados (Bieby Voijant et al., 2011).

Los metales pesados también se pueden encontrar en suelos y en medios acuosos, en actividades humanas tales como relaves mineros rico en metales, fundición de metales, galvanoplastia, escape de gases, energía y producción de combustible (Alkorta et al., 2004).

El uso constante de metales en la vida cotidiana presenta un riesgo constante para la salud humana y animal (Gwaltney-Brant, 2013).

Los metales pesados son integrados al agroecosistema mediante procesos naturales y actividades antropogénicas (Li et al., 2019), se acumulan en diferentes sectores ambientales tales como (suelo, aire, agua) (Bakshe & Jugade, 2023).

2.5 Biorremediación

La biorremediación puede emplearse en organismos contaminados del sitio o de otros sitios puede ser in situ o ex situ ya sea en condiciones aerobias o anaerobias (Martínez-Prado, Pérez-López, Pinto-Espinoza, Gurrola-Nevárez, & Osorio-Rodríguez, 2011).

En América Latina, se encuentra un alto grado de contaminación de suelos y ecosistemas; por lo cual, esta técnica es factible, económica, ayuda a degradar contaminantes (Rodríguez-Gonzales, Zárate-Villarroe, & Bastida-Codina, 2022).

2.5 Fitorremediación

La fitorremediación (phyto que significa planta y remediación que significa mal por subsanar), este proceso se realiza a través de plantas las cuales ayudan a remover, estabilizar, transferir, concentrar o en su defecto destruir contaminantes ya sean orgánicos o inorgánicos que se encuentren presentes en suelos, lodos y sedimentos (Valdivia, del Pilar Aponte, Bustamante, & Chomba, 2018).

La fitorremediación de las plantas acumuladoras implica establecer plantas en un suelo contaminado con metales, estas tienen la capacidad de acumular más de un metal en su estructura raíz, hoja, etc. Durante su desarrollo esto se llama fitoextracción el manejo donde los metales que son extraídos mediante el uso de plantas hiperacumuladoras se le llama fitominería (C. Anderson, Moreno, & Meech, 2005)

La relación que existe entre las plantas y la mineralización ha sido observada desde la época medieval, sin embargo, hasta el siglo XX fue factible analizar tejidos vegetales para determinar las concentraciones de metales presentes en estos (C. W. N. Anderson et al.)

Se ha demostrado que la fitorremediación es de gran utilidad en la remediación de relaves mineros y suelos contaminados, Los resultados de estudios realizados promueven un gran interés en encontrar nuevas especies de plantas que sean tolerantes para obtener enfoques de biorremediación más eficaces (Wang et al., 2017).

Las plantas que salen a orillas de la carretera pueden absorber directamente metales pesados a través de la raíz, hojas y tallos (Zhai et al., 2016).

2.6 Fitoestabilización

Esta técnica permite que el suelo contaminado sea cubierto por vegetación tolerante a altas concentraciones de elementos tóxicos, limitando la erosión del suelo y la lixiviación de contaminantes al agua subterránea (Shawai et al., 2017).

2.6 *Cynodon dactylon* (L.) Pers. (Bermuda)

Es caracterizada por tener ventajas tales como, ser resistente a las bajas alturas de corte, obtener una recuperación pronta después de un pisoteo o corte (Laurencena et al., 2009).

2.7 *Kalanchoe Serrata*

Los *kalanchoe serrata* son arbustos perennes, extendidos en forma de mechones, quebradizos con una ramificación densa particularmente desde la base, con capas desordenadas, suculenta, pueden llegar a medir hasta 50cm de altura (Smith, Figueiredo, & Bernhard, 2019).

2.8 *Rye Grass*

El *Rye Grass* (*Lolium perenne* L.) es una gramínea de suma importancia cual es sembrada en zonas donde el clima es templado, por su calidad y subsistencia esta planta provee un forraje y césped de excelentes condiciones adaptables al ambiente (Xu, Schubert, & Altpeter, 2001)

Es un pasto con aumento sustancial de alta productividad de macollo, la planta puede llegar a medir de 25 a 40 cm de altura, sus tallos son de forma cilíndrica, produce espigas que se agrupan, la semilla se caracteriza por tener barbas de diferentes longitudes, la planta tiene el potencial de producir tallos subterráneos que ayudan a obtener nuevos brotes que ayudan a cubrir rápido una superficie de suelo (SIAP, 2023).

III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El desarrollo de esta investigación se llevó en una estructura geodésica, cubierta de malla sobra (figura 2) dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna (UAAAN UL) en Torreón Coahuila (figura 1), perteneciente a la Comarca Lagunera, ubicada en las siguientes coordenadas geográficas ($101^{\circ} 40'$ y $104^{\circ} 45'$ O y $25^{\circ} 05'$ y $26^{\circ} 54'$ N) esta región se encuentra en el norte de México, en una altitud de 1,139 msnm con una temperatura media anual de 18.5°C así como una precipitación pluvial anual de 235 mm, en el verano el clima llega a ser cálido-seco y en invierno semifrío a frío (Schmidt, 1989).

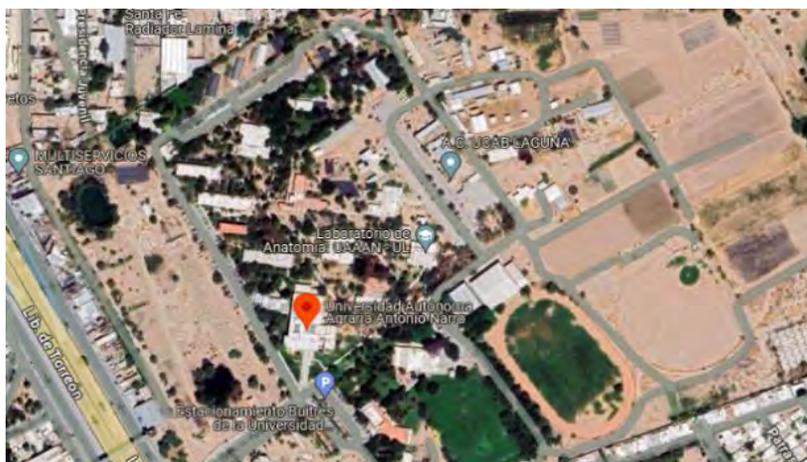


Figura 1.- Mapa de UAAAN UL (maps, 2024b).



Figura 2. Estructura en la que se estableció el experimento.

3.2 Ubicación de la presa de jales

La presa de jales se encuentra en el municipio de Hidalgo del Parral en el estado de Chihuahua al norte de México. Generados por la mina llamada San Juanico, ubicada en las siguientes coordenadas N 47.9° 6' 56' W 39.8° 105' 42' (figura 3).



Figura 3.- Ubicación de Hidalgo del Parral, Chihuahua (maps, 2024a).

3.3 Toma de Muestras de sustratos

El muestreo de sustratos se realizó a una profundidad de 0 a 20 cm. En forma de zigzag (figura 4) tomando dos muestras en los jales de mina, y en el campo experimental de la UAAAN UL se recolectó la tercera muestra de sustrato, el cual fue el testigo.



Figura 4.- Sustrato de jales de mina.

3.4 Secado de muestras

Se realizó el secado de los sustratos a la intemperie, en exposición al sol por tres días (figura 5), posteriormente se tomaron muestras de 1 kg de cada una las cuales se tamizaron y se colocaron en bolsas de plástico (figura 6) para realizar el análisis físico químico.



Figura 5.- Secado de sustrato.



Figura 6.- Muestras de sustrato para análisis.

3.5 Recolección de plantas

Se recolectaron plantas de *Kalanchoe serrata* de los jardines de la universidad, de 5 cm de altura, las cuales fueron colocadas en una charola y se les aplicó riego 2 veces por semana durante 2 meses, hasta tener una altura máxima de 16 cm para poder trasplantar a macetas (figura 7).



Figura 7.- Platas de *Kalanchoe serrata*.

3.6 Pruebas de germinación de semillas

De las semillas de las especies en estudio (*Lolium perene* L.) y (*Cynodon dactylon*) se seleccionaron 100 semillas de cada especie (figura 8) y se colocaron en cajas Petri en las cuales también se le agregó una muestra de sustrato previamente seleccionada, cada tratamiento fue regado cada tercer

día con un atomizador por un lapso de 10 días, para obtener su porcentaje de germinación (figura 9).



Figura 8.- Semillas seleccionadas.



Figura 9.- Población de semillas germinadas.

3.7 Análisis físico químicos de sustratos

En el laboratorio de suelos de la UAAAN UL se determinaron los siguientes características físicas y químicas:

Materia orgánica

De los sustratos recolectados se realizó un análisis de materia orgánica mediante el método de Walkley y Black

Conductividad eléctrica (CE) y Potencial de hidrogeno (pH)

Se realizaron las mediciones de CE y pH mediante el método de potenciómetro

Capacidad Intercambio Catiónico (CIC)

Se determinó intercambio catiónico mediante el método de cloruro de bario.

Textura

Determinación de textura por el método de hidrómetro de Bouyoucos.

Densidad aparente

Determinación de densidad aparente por el método de (parafina).

3.13 Tratamientos evaluados

Se presenta la distribución de los tratamientos la cual fue de 3 tipos de sustrato y 3 especies de plantas (cuadro 1).

Cuadro 1.- Distribución de los tratamientos

Tratamiento	Sustrato	Especie
1	Gris	<i>Lolium perene</i>
2	Testigo	<i>Lolium perene</i>
3	Rojo	<i>Lolium perene</i>
4	Gris	<i>Cynodon dactylon</i>
5	Testigo	<i>Cynodon dactylon</i>
6	Rojo	<i>Cynodon dactylon</i>
7	Gris	<i>Kalanchoe serrata</i>
8	Testigo	<i>Kalanchoe serrata</i>
9	Rojo	<i>Kalanchoe serrata</i>

3.9 Preparación de macetas

En macetas de 2 kilos se depositó muestras de cada uno de los 3 tipos de sustrato, el cual se combinó con perlita, en una relación de volumen 50% – 50% de cada uno en igualdad de proporción para de esta manera tener una mejor absorción, retención y porosidad de agua en las macetas (figura 10).



Figura 10.- Preparación de macetas.

3.10 Establecimiento de experimento

El día 12 de julio del 2022 se llevó a cabo el trasplante de las plantas *Kalanchoe serrata* y la siembra de semilla de los dos tipos de pastos de las especies Ballico (*Lolium perene L.*) Bermuda (*Cynodon dactylon*) en las macetas previamente preparadas, de manera superficial solo recubriendo con una pequeña capa de sustrato, dando un riego de inicio de 500 ml. de agua con una regadera, para posteriormente realizar riegos periódicos de 250 ml. de agua simple cada tercer día durante 8 semanas (figura 11).



Figura 11.- Siembra y trasplante.

3.11 Análisis de agua de riego

Se realizó un análisis al agua que fue utilizada para el riego de las macetas utilizadas durante el experimento, la cual se envió para su análisis a el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

3.12 Calendario de riegos

Los riegos se realizaron cada tercer día con un volumen de 250 ml. Durante 8 semanas, para mantener el sustrato a capacidad de campo.

3.13 Medición de altura de planta

Se realizó la medición de la altura de planta de cada tratamiento una vez por semana, con la ayuda de una regla se determinó la altura de planta durante el desarrollo del experimento (figura 12).



Figura 12.- Toma de altura de planta.

3.14 Cosecha de plantas

Se cosecho el día 12 de septiembre del 2022, sacando las plantas de las macetas, separando la raíz y parte aérea, fueron colocadas en bolsas de papel canela previamente perforadas e identificadas, se pusieron a secar a la intemperie a una temperatura promedio de 28 grados centígrados durante 45 días (figura 13).



Figura 13.- Secado de raíz y parte aérea.

3.15 Secado de muestras

Se procedió a un segundo secado de las muestras, en una estufa marca Felisa (figura 14), en la cual se colocaron las muestras durante 24 horas a una temperatura de 65 °C en el laboratorio de suelos UAAAN UL. (figura 15).



Figura 14.- Estufa de secado marca Felisa.



Figura 15.- Secado de muestras en Estufa.

3.16 Molido de la raíz y parte aérea

Se procedió a realizar la molienda de las muestras, en un molino eléctrico tipo Wiley mini (figura 16), una vez que se obtuvo la muestra molida se colocó en unas bolsas transparentes ya identificadas (figura 17).



Figura 16.- Molido de muestras.



Figura 19.- Calcinación.

Después de la calcinación fueron retirados, se dejó enfriar la ceniza (figura 20), y se le agregó 10 ml de ácido clorhídrico (HCL) al 37%, se agitó por 10 segundos y se dejó reposar por 20 minutos (figura 21).



Figura 20.- Enfriado de ceniza.



Figura 21.- Reposo de muestra.

Posteriormente las muestras contenidas en los crisoles fueron vaciadas a un matraz volumétrico de 100 ml. se le agregó 10 ml de Cloruro de Cesio (CsCl) y se terminó de aforar con agua destilada (figura 22).



Figura 22.- Filtrado de muestras.

Se filtró el contenido del matraz en botes de plástico de 100 ml (figura 23), el filtrado obtenido fue utilizado para hacer la lectura de oro y plata (figura 24).



Figura 23.- Segundo filtrado de muestra.



Figura 24.- Muestra obtenida.

3.18 Determinación de metales pesados

La determinación de los metales oro y plata (figura 25) se realizó en el espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer 2380 (figura 26).



Figura 25.- Muestras a analizar.



Figura 26.- Determinación de oro y plata en el espectrofotómetro.

3.19 Análisis estadístico de los datos

El diseño experimental fue completamente al azar con un arreglo factorial de 3x3 con 4 repeticiones y los datos que se obtuvieron se analizaron mediante una prueba de comparación de medias de Tukey. Para el análisis de datos se utilizó el paquete estadístico SAS versión 9.0. (SAS, 2020).

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de Sustrato

Los análisis de sustratos presentaron para la M.O. el gris con 0.39 %, rojo 0.07% con muy bajo porcentaje, y por último al testigo con 2.21% siendo el que presento más alto contenido (cuadro 2).

Cuadro 2.- Resultados de los análisis fisicoquímicos de los sustratos utilizados.

Parámetro	Valor	Gris	Rojo	Testigo
pH		6.55	7.69	7.83
CE	Ms/cm	3.42	2.10	1.96
M. O.	%	0.39	0.07	2.21
C.I.C.	Meq/100g	8	10	37
D. A.	gr/cm ³	1.44	1.60	1.56
Textura		Franco	Franco	Areno - migajón

4.2 Determinación de Oro y plata en sustratos

Los resultados obtenidos de los sustratos para el metal oro, la mayor concentración es el sustrato gris con 0.416 ppm seguido del sustrato rojo con 0.250 ppm y por último el testigo presentando 0.083 ppm. Para la concentración de plata se pudo observar que en el sustrato gris se encontraron 0.125 ppm, seguido del sustrato rojo con 0.162 ppm y por último el testigo con 0.012 ppm (cuadro 3).

Cuadro 3.- Resultados de análisis de oro y plata en los sustratos.

Sustrato	Oro	Plata	Unidades
Gris	0.416	0.125	ppm
Rojo	0.250	0.162	ppm
Testigo	0.083	0.012	ppm

ppm= Partes por millón

4.3 Análisis de agua

Resultados de análisis del agua utilizada para el riego.

Cuadro 4.- Análisis de agua parámetros Cationes y Aniones

Parámetros	Símbolo	Resultado
Calcio (meq/L)	Ca ⁺⁺	2.68
Magnesio (meq/L)	Mg ⁺⁺	1.60
Sodio (meq/L)	Na ⁺	1.83
Potasio (meq/L)	K ⁺	0.16
Carbonatos (meq/L)	CO ₃ ⁻	ND
Bicarbonatos (meq/L)	HCO ₃ ⁻	1.26
Cloruros (meq/L)	Cl ⁻	3.50
Sulfatos (meq/L)	SO ₄ ⁻	1.80

ND = No detectado

Cuadro 5.- Resultados de análisis de agua parámetros Salinidad

Parámetros	Símbolo	Resultado
Conductividad Eléctrica (dS/m)	EC _w	0.6923
Sólidos totales disueltos	STD	443.07
Potencial de Hidrogeno	pH	7.37
RAS	RAS	1.25

4.4 Medición de plantas

4.4.1 Altura *Lolium perene* L.

Las mediciones se realizaron cada semana, donde se observó que el sustrato rojo con la planta *Lolium perene* L. en la fecha 10 de septiembre 2022 presentó el mejor desarrollo con una altura máxima 34.25 cm, en comparación al testigo con la planta *Lolium perene* L. que presento una altura máxima de 22.50 cm y por último se pudo observar que el sustrato gris con la planta *Lolium perene* L. detuvo su crecimiento en la fecha 20 de agosto 2022 obteniendo una altura máxima de 10.75 cm con muy poco crecimiento alcanzando una altura máxima 22.50 cm (cuadro 6).

Cuadro 6.- Tendencias del desarrollo de plantas *Lolium perene* L.

Fecha	Gris	Rojo	Testigo	Unidad
16 de julio 2022	1.00	7.88	6.50	cm.
23 de julio 2022	2.88	12.63	10.13	cm.
30 de julio 2022	6.50	16.75	12.00	cm.
05 de agosto 2022	8.38	20.75	14.13	cm.
11 de agosto 2022	9.38	25.13	16.25	cm.
20 de agosto 2022	10.75	29.50	19.50	cm.
27 de agosto 2022	10.75	32.00	22.00	cm.
03 de septiembre 2022	10.75	33.75	22.38	cm.
10 de septiembre 2022	10.75	34.25	22.50	cm.

cm. = centímetros

4.4.2 Altura *Cynodon dactylon*

Las mediciones se realizaron cada semana, observando el sustrato rojo con la planta *Cynodon dactylon* presento el mejor desarrollo con una altura máxima de 31.88 cm, seguido del tratamiento testigo con la planta *Cynodon dactylon* alcanzando una altura máxima de 28 cm y por último el tratamiento gris con la planta *Cynodon dactylon* obteniendo su máxima altura de 1.13 cm observando que el crecimiento de planta en este tratamiento se detuvo desde la fecha 30 de julio 2022 (cuadro 7).

Cuadro 7.- Tendencias del desarrollo de plantas *Cynodon dactylon*.

Fecha	Gris	Rojo	Testigo	Unidad
16 de julio 2022	0.25	6.13	3.13	cm.
23 de julio 2022	0.88	9.88	5.88	cm.
30 de julio 2022	1.13	13.38	9.63	cm.
05 de agosto 2022	1.13	17.63	12.75	cm.
11 de agosto 2022	1.13	21.38	15.75	cm.
20 de agosto 2022	1.13	24.50	18.50	cm.
27 de agosto 2022	1.13	28.13	24.00	cm.
03 de septiembre 2022	1.13	30.63	26.38	cm.
10 de septiembre 2022	1.13	31.88	28.00	cm.

cm. = centímetros

4.4.3 Altura *Kalanchoe serrata*

La medición de planta se realizó cada semana, se observó que el tratamiento de sustrato testigo con la planta *Kalanchoe serrata* presento un buen desarrollo en comparación a los otros tratamientos, teniendo una altura máxima de 33.50 cm. Seguido del tratamiento de sustrato rojo con la planta *Kalanchoe serrata* obteniendo una altura máxima de 31.88 cm y por último el tratamiento de sustrato gris con planta *Kalanchoe serrata* alcanzando una altura de 27.88 cm (cuadro 8).

Cuadro 8.- Tendencias del desarrollo de plantas *Kalanchoe serrata*.

Fecha	Gris	Rojo	Testigo	Unidad
16 de julio 2022	11.63	15.25	15.00	cm.
23 de julio 2022	14.50	19.63	19.75	cm.
30 de julio 2022	17.88	22.88	23.13	cm.
05 de agosto 2022	20.75	26.13	25.88	cm.
11 de agosto 2022	23.88	27.00	26.75	cm.
20 de agosto 2022	25.50	28.50	28.75	cm.
27 de agosto 2022	27.00	30.38	29.75	cm.
03 de septiembre 2022	27.88	32.00	32.88	cm.
10 de septiembre 2022	27.88	33.38	33.50	cm.

cm. = centímetros

4.5 Concentración de metales en partes de la planta

A continuación, se presentan los resultados observados de la acumulación de oro y plata en las partes vegetativas (raíz y parte aérea).

4.5.1 Oro

Se observó que la mayor concentración de oro se presentó en la raíz, siendo el tratamiento de sustrato gris y especie de planta *Lolium perene L.* con una media de 18.497 ppm, mientras que las interacciones entre el sustrato rojo con la especie *Lolium perene L.* obtuvo una media de 16.296 ppm y se observó que en el tratamiento testigo no hubo diferencia estadística en ninguna especie de planta (cuadro 9).

Cuadro 9.- Concentración de oro en la interacción sustrato y raíz

Sustrato	Planta	Raíz	Unidades	Significancia
		\bar{x}		
Gris	<i>Lolium perene L.</i>	18.497	ppm	a
Testigo	<i>Lolium perene L.</i>	ND	ppm	c
Rojo	<i>Lolium perene L.</i>	16.296	ppm	a
Gris	<i>Cynodon dactylon</i>	17.485	ppm	a
Testigo	<i>Cynodon dactylon</i>	ND	ppm	c
Rojo	<i>Cynodon dactylon</i>	8.148	ppm	b
Gris	<i>Kalanchoe serrata</i>	16.296	ppm	a
Testigo	<i>Kalanchoe serrata</i>	ND	ppm	c
Rojo	<i>Kalanchoe serrata</i>	8.148	ppm	b

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$)
 ND=No Detectado

De acuerdo a los resultados obtenidos pudimos observar diferencia estadística altamente significativa entre los tratamientos. En la parte aérea se pudo observar que la concentración de oro fue mayor en el tratamiento de sustrato gris con las tres especies de planta se observó que el *Cynodon dactylon* tuvo mayor extracción con una media de 18.047 ppm. Seguido del sustrato rojo con las tres especies siendo *Kalanchoe serrata* la mejor planta extractora con una media de 16.296 ppm y por último el sustrato testigo con las tres especies no presentó diferencia estadística (cuadro 10).

Cuadro 10.- Concentración de oro en la interacción sustrato y parte aérea.

Sustrato	Planta	Parte aérea	Unidades	Significancia
		\bar{x}		
Gris	<i>Lolium perene L.</i>	ND	ppm	c
Testigo	<i>Lolium perene L.</i>	ND	ppm	c
Rojo	<i>Lolium perene L.</i>	4.074	ppm	bc
Gris	<i>Cynodon dactylon</i>	18.047	ppm	a
Testigo	<i>Cynodon dactylon</i>	ND	ppm	c
Rojo	<i>Cynodon dactylon</i>	8.148	ppm	b
Gris	<i>Kalanchoe serrata</i>	16.296	ppm	ab
Testigo	<i>Kalanchoe serrata</i>	ND	ppm	c
Rojo	<i>Kalanchoe serrata</i>	16.296	ppm	ab

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$)

ND=No Detectado

4.5.2 Plata

En base a la concentración de plata en la raíz, se encontró diferencia altamente significativa, siendo el tratamiento de sustrato gris con *Cynodon dactylon* obteniendo una media de 11.55 ppm, siguiendo el tratamiento con sustrato rojo con *Cynodon dactylon* con una media de 8.07, se observó que los tratamientos testigo no presento presencia de plata en la raíz (cuadro 11).

Cuadro 11.- Concentración de plata en la interacción sustrato y raíz

Sustrato	Planta	Raíz	Unidades	Significancia
		\bar{x}		
Gris	<i>Lolium perene L.</i>	6.11	ppm	c
Testigo	<i>Lolium perene L.</i>	ND	ppm	f
Rojo	<i>Lolium perene L.</i>	5.38	ppm	d
Gris	<i>Cynodon dactylon</i>	11.55	ppm	a
Testigo	<i>Cynodon dactylon</i>	ND	ppm	f
Rojo	<i>Cynodon dactylon</i>	8.07	ppm	b
Gris	<i>Kalanchoe serrata</i>	5.38	ppm	d
Testigo	<i>Kalanchoe serrata</i>	ND	ppm	f
Rojo	<i>Kalanchoe serrata</i>	2.69	ppm	e

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$)

ND=No Detectado

En los resultados obtenidos, de acuerdo a la prueba estadística se observó diferencia altamente estadística entre los tratamientos, siendo el sustrato gris con *Lolium perene L.* el que obtuvo mayor presencia de plata en los tejidos de la parte aérea, con una media de 9.40 ppm, seguido del sustrato gris con *Cynodon dactylon* con una media de 5.95 ppm. Para los otros tratamientos también se detectó diferencia significativa, sin embargo el tratamiento testigo no obtuvo presencia de plata en la parte aérea (cuadro 12).

Cuadro 12.- Concentración de plata en la interacción sustrato y parte aérea.

Sustrato	Planta	Parte aérea	Unidades	Significancia
		□		
Gris	<i>Lolium perene L.</i>	9.40	ppm	a
Testigo	<i>Lolium perene L.</i>	ND	ppm	e
Rojo	<i>Lolium perene L.</i>	2.01	ppm	d
Gris	<i>Cynodon dactylon</i>	5.95	ppm	b
Testigo	<i>Cynodon dactylon</i>	ND	ppm	e
Rojo	<i>Cynodon dactylon</i>	4.03	ppm	c
Gris	<i>Kalanchoe serrata</i>	2.69	ppm	cd
Testigo	<i>Kalanchoe serrata</i>	ND	ppm	e
Rojo	<i>Kalanchoe serrata</i>	2.69	ppm	cd

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$)

ND=No Detectado

Discusión

En los sustratos obtenidos de los jales mineros, se puede observar que el sustrato gris tenía el mayor porcentaje de materia orgánica. De acuerdo con (Diego, José Ramón, Juan, & Felipe, 2020) Los sustratos de mina contienen bajos porcentajes de materia orgánica, así como su poca capacidad de retener agua, y casi nula actividad biológica, los sustratos de residuos de minas obtuvieron diferencias en sus comparación con suelos de uso agrícola, esto debido a su procedencia.

En el análisis de agua que se le realizó al agua corriente, la cual proviene del pozo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, se observó que el RAS y la conductividad eléctrica (CE) se encuentran dentro de los valores permitidos que establece la FAO. Esto concuerda con lo reportado por (Gómez, Muñoz, & Rodríguez, 2015) quienes concluyen que los valores de la (CE) y parámetros de RAS no presentan riesgos para el uso de agua en la agricultura.

En altura de planta de acuerdo a los resultados obtenidos se pudo observar que la especie *Lolium perene* L. alcanzó una altura máxima de 34.25 cm, concordando con lo reportado por (SIAP, 2023) quien menciona que la altura de esta especie puede llegar a ser de 25 a 40 cm de altura.

En la medición de altura para el *Kalanchoe serrata* se obtuvo una altura máxima de 33.50, difiriendo a lo descrito por (Smith et al., 2019) quienes mencionan que la altura máxima de esta especie puede llegar hasta 50cm.

Para la concentración de oro en raíz se pudo observar que el tratamiento de sustrato gris con la especie de planta *Lolium perene* L fue el mejor tratamiento debido a que obtuvo una mejor concentración, concordando con (Lamb, Anderson, & Haverkamp, 2001) quienes mencionan que la mayor presencia del metal oro es más alta en raíces en comparación a los tallos y hojas de las plantas en las cuales se encuentran menor concentración de este. Así también (Chaney et al., 2007) aporta que las raíces tienen mayor absorción de metales presentes en el suelo. (Victor et al., 2011) menciona que las plantas absorben mayor concentración de metales pesados en sus tejidos, teniendo la mayor extracción en las raíces de las plantas. El tratamiento de sustrato rojo con la especie *Kalanchoe serrata* presentó menor concentración de oro en la raíz con una media de 8.14 ppm, estos resultados concuerdan con lo reportado por (Wilson-Corral, Anderson, Rodriguez-Lopez, Arenas-Vargas, & Lopez-Perez, 2011) quien describe que esta especie presenta bajas concentraciones de oro.

En los resultados obtenidos en parte aérea, se pudo observar que el mejor tratamiento fue el de sustrato gris con la especie de planta *Cynodon dactylon* adquiriendo la mayor concentración de oro en su parte aérea, concordando con (Shahid et al., 2017) quienes aportan que la concentración de metales pesados en las hojas de las plantas puede variar dependiendo del metal a extraer. Mientras que (Cole & Smith, 1984) difiere de los resultados obtenidos ya que menciona que la concentración es menor en la parte aérea de la planta.

En los resultados obtenidos en la concentración de plata en la raíz y parte aérea, se pudo observar que los tratamientos de sustrato gris con especie de planta

Cynodon dactylon obtuvo la mayor concentración en la raíz, y para la parte aérea el tratamiento que extrajo más concentración de plata fue el de sustrato gris con especie de planta *Lolium Perene L.* De acuerdo con (Dinh et al., 2022a) mencionan que las plantas hiperacumuladoras tienen el potencial de extraer plata en forma de nanopartículas, mediante sus tejidos tales como el tallo y parte aérea, así también dice que es viable la utilización de plantas para la obtención de metales pesados.

(C. W. Anderson et al., 2003) menciona que la fitominería de sustratos mineros es viable para la extracción de metales preciosos, así también esto ayuda a contribuir con la búsqueda de nuevas especies de plantas que puedan ser hiperacumuladoras para la obtención de metales. (Victor et al., 2012) dicen que la extracción de metales en los residuos mineros en los cuales se usan diferentes especies de planta como una alternativa para la recuperación de metales preciosos en relaves.

V.- CONCLUSIONES

Los sustratos recolectados en presas de jales mineros presentaron concentraciones de metales preciosos, siendo el sustrato gris el que obtuvo mayor concentración, en cuanto a las plantas, las especies que presentaron la mayor absorción en sus partes vegetativas, fueron *Lolium perene L.* la cual acumulo mayor contenido de oro en la raíz y la parte aérea presento mayor acumulación de plata. El *Cynodon dactylon* presento una mayor acumulación de oro en la parte aérea y en la raíz tuvo mayor absorción de plata, mientras que la especie *Kalanche serrata* fue la planta que menor absorción tuvo en sus tejidos. Las especies tienen la capacidad de absorber metales en su estructura vegetativa.

Se sugiere seguir evaluando nuevas especies de plantas hiperacumuladoras de oro y plata.

VI.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akinbile, B. J., Makhubela, B. C. E., & Ambushe, A. A. (2023). Phytomining of valuable metals: status and prospective-a review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(16), 3913-3933.
- Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J. M., Amezaga, I., Albizu, I., Onaindia, M., & Garbisu, C. (2004). Chelate-enhanced phytoremediation of soils polluted with heavy metals. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 3, 55-70.
- Anderson, C., Moreno, F., & Meech, J. (2005). A field demonstration of gold phytoextraction technology. *Minerals Engineering*, 18(4), 385-392. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.07.002>
- Anderson, C. W., Stewart, R. B., Moreno, F. N., Wreesmann, C. T., Gardea-Torresdey, J. L., Robinson, B. H., & Meech, J. A. (2003). *Gold phytomining. Novel developments in a plant-based mining system*. Paper presented at the Proceedings of the Gold 2003 Conference: New Industrial Applications of Gold.
- Anderson, C. W. N., Stewart, R. B., Moreno, F. N., Wreesmann, C. T. J., Gardea-Torresdey, J. L., Robinson, B. H., & Meech, J. A. (2003). *Gold phytomining. Novel developments in a plant-based mining system*.
- Bakshe, P., & Jugade, R. (2023). Phytostabilization and rhizofiltration of toxic heavy metals by heavy metal accumulator plants for sustainable management of contaminated industrial sites: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100293. doi:<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100293>
- Bieby Voijant, T., Siti Rozaimah, S. A., Hassan, B., Mushrifah, I., Nurina, A., & Muhammad, M. (2011). A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. 2011, 1-31.
- Brooks, R. R., Chambers, M. F., Nicks, L. J., & Robinson, B. H. (1998). Phytomining. *Trends in plant science*, 3(9), 359-362.
- Brooks, R. R., Lee, J., Reeves, R. D., & Jaffre, T. (1977). Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of*

Geochemical Exploration, 7, 49-57. doi:[https://doi.org/10.1016/0375-6742\(77\)90074-7](https://doi.org/10.1016/0375-6742(77)90074-7)

Carlos, C., & Fernando, V. (2022). Efficient Use of Water in Tailings Management: New Technologies and Environmental Strategies for the Future of Mining. *14*(11), 1741.

Chaney, R. L., Angle, J. S., Broadhurst, C. L., Peters, C. A., Tappero, R. V., & Sparks, D. L. J. J. o. E. Q. (2007). Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies. *36*(5), 1429-1443.

Cole, M. M., & Smith, R. F. (1984). Vegetation as Indicator of Environmental Pollution. *Transactions of the Institute of British Geographers*, *9*(4), 477-493. doi:10.2307/621782

Dang, P., & Li, C. (2022). A mini-review of phytomining. *International Journal of Environmental Science & Technology*, *19*(12), 12825-12838. doi:10.1007/s13762-021-03807-z

Diego, A., José Ramón, V., Juan, A., & Felipe, M. (2020). Calidad ambiental de suelos y aguas de la Mina Fé: situación inicial y alternativas de recuperación

Environmental quality of soils and waters in Fé Mine: Initial situation and remediation alternatives. *Spanish Journal of Soil Science: SJSS*, *10*(1), 81-100.

Dinh, T., Dobo, Z., & Kovacs, H. (2022a). Phytomining of noble metals – A review. *Chemosphere*, *286*, 131805. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131805>

Dinh, T., Dobo, Z., & Kovacs, H. (2022b). Phytomining of rare earth elements – A review. *Chemosphere*, *297*, 134259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134259>

Gómez, J. J. C., Muñoz, R. B., & Rodríguez, M. d. L. H. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*, *19*(1), 39-50.

Gwaltney-Brant, S. M. (2013). Chapter 41 - Heavy Metals. In W. M. Haschek, C. G. Rousseaux, & M. A. Wallig (Eds.), *Haschek and Rousseaux's Handbook*

- of Toxicologic Pathology (Third Edition)* (pp. 1315-1347). Boston: Academic Press.
- Lamb, A. E., Anderson, C. W. N., & Haverkamp, R. (2001). The induced accumulation of gold in the plants *Brassica juncea*, *Berkheya coddii* and chicory. *Chemistry in New Zealand*, *65*, 34-36.
- Laurencena, M. I., Carponi, M. S., Reinoso, P. D., Butus, M., Scorciapino, C., Galli, M., & Pérez, G. (2009). Comportamiento de céspedes de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. en Paraná, Entre Ríos, Argentina. *Ciencia, docencia y tecnología*(39), 129-141.
- Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., & Han, W. (2019). A Review on Heavy Metals Contamination in Soil: Effects, Sources, and Remediation Techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, *28*(4), 380-394. doi:10.1080/15320383.2019.1592108
- Liang, S. X., Y., J., W., L., Li, X., Shen, G. S., & L., D. (2017). Feasibility of Pb phytoextraction using nano-materials assisted ryegrass: Results of a one-year field-scale experiment. *Journal of Environmental Management*, *190*, 170-175. doi:10.1016/j.jenvman.2016.12.064
- Liuwei, W., Deyi, H., Zhengtao, S., Jin, Z., Xiyue, J., Yong Sik, O., . . . Jörg, R. (2020). Field trials of phytomining and phytoremediation: A critical review of influencing factors and effects of additives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *50*(24), 2724-2774. doi:10.1080/10643389.2019.1705724
- Maluckov, B. S. J. J. (2015). Bioassisted phytomining of gold. *67*, 1075-1078.
- maps, G. (2024a). Ubicacion Hidalgo del Parral, Chihuahua, México. Retrieved from https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1x9c3p622h24spJuXsyvU7DNd7do&hl=en_US&ll=26.932242999999993%2C-105.68084300000001&z=17
- maps, G. (2024b). Ubicacion Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, Torreón, Coahuila México

- Retrieved from
<https://www.google.com/maps/search/google+maps+uaaan+ul/@25.557446,-103.3754915,653m/data=!3m1!1e3?entry=ttu>
- Martínez-Prado, A., Pérez-López, M. E., Pinto-Espinoza, J., Gurrola-Nevárez, B. A., & Osorio-Rodríguez, A. L. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(3), 241-252.
- Philip Isaac, O., Mehmet Salim, Ö., Meltem, Ç., & Mehmet, K. (2018). Heavy metal pollution and spatial distribution in surface sediments of Mustafakemalpaşa stream located in the world's largest borate basin (Turkey). *Chemosphere*, 208, 782-792. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.031>
- Robles Berumen, R., & Foladori, G. (2019). Una revisión histórica de la automatización de la minería en México. *Problemas del desarrollo*, 50(197), 157-180.
- Rodríguez-Gonzales, A., Zárate-Villarroe, S. G., & Bastida-Codina, A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(1), 178-208.
- SAS. (2020). SAS 9.4. Retrieved from https://www.sas.com/es_mx/learn/academic-programs/software.html
- Schmidt, R. H. (1989). The arid zones of Mexico: climatic extremes and conceptualization of the Sonoran Desert. *Journal of Arid Environments*, 16(3), 241-256. doi:[https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)30940-6](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)30940-6)
- Sekhohola-Dlamini, L. M., Keshinro, O. M., Masudi, W. L., & Cowan, A. K. J. M. (2022). Elaboration of a Phytoremediation Strategy for Successful and Sustainable Rehabilitation of Disturbed and Degraded Land. 12(2), 111.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Niazi, N. K. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A

- comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 36-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>
- Shawai, S. A. A., Muktar, H. I., Bataiya, A. G., Abdullahi, I. I., Shamsuddin, I. M., Yahaya, A. S., & Suleiman, M. (2017). A review on heavy metals contamination in water and soil: effects, sources and phytoremediation techniques. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 2(2), 21-27.
- Sheoran, V., S.Sheoran, A., & Poonia, P. (2013). Phytomining of gold: A review. *Journal of Geochemical Exploration*, 128, 42-50. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.01.008>
- Sheoran, V., Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2009). Phytomining: A review. *Minerals Engineering*, 22(12), 1007-1019. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.04.001>
- SIAP. (2023). RYE GRASS. *Servicio de Información Agroalimentario y Pesquera*.
- Smith, G. F., Figueiredo, E., & Bernhard, S. (2019). Taxonomy of the Madagascan *Kalanchoe serrata* Mannoni & Boiteau (Crassulaceae). *Bradleya*, 2019(37), 125-132.
- V., S., A., S. S., & P., P. (2013). Phytomining of gold: A review. *Journal of Geochemical Exploration*, 128, 42-50. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.01.008>
- Valdivia, J. E. G., del Pilar Aponte, M., Bustamante, E., & Chomba, J. (2018). Fitorremediación de un suelo contaminado con dos niveles de cobre, mediante el uso del cultivo de la alfalfa "Medicago sativa". *Searching-Science*, 1(1).
- Victor, W.-C., Christopher, A., Mayra, R.-L., Miguel, A.-V., & Joel, L.-P. (2011). Phytoextraction of gold and copper from mine tailings with *Helianthus annuus* L. and *Kalanchoe serrata* L. *Minerals Engineering*, 24(13), 1488-1494. doi:10.1016/j.mineng.2011.07.014
- Victor, W.-C., Christopher W. N., A., & Mayra, R.-L. (2012). Gold phytomining. A review of the relevance of this technology to mineral extraction in the 21st

- century. *Journal of Environmental Management*, 111, 249-257.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.037>
- Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., & Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 184, 594-600.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025>
- Wilson-Corral, V., Anderson, C., Rodriguez-Lopez, M., Arenas-Vargas, M., & Lopez-Perez, J. (2011). Phytoextraction of gold and copper from mine tailings with *Helianthus annuus* L. and *Kalanchoe serrata* L. *Minerals Engineering*, 24(13), 1488-1494.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.07.014>
- Xu, J., Schubert, J., & Altpeter, F. (2001). Dissection of RNA-mediated ryegrass mosaic virus resistance in fertile transgenic perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *The Plant Journal*, 26(3), 265-274.
doi:<https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2001.01025.x>
- Zambrano, M. A. A. (2022). Historia y consecuencias de la minería en México. *El cazahuate*(4).
- Zhai, Y., Dai, Q., Jiang, K., Zhu, Y., Xu, B., Peng, C., . . . Zeng, G. (2016). Traffic-related heavy metals uptake by wild plants grow along two main highways in Hunan Province, China: effects of soil factors, accumulation ability, and biological indication potential. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 13368-13377.